

УДК 532.613.4

**Динамика всплытия кластера
монодисперсных капель
в другой несмешивающейся жидкости
в присутствии поверхностно-активного вещества***

В.А. Архипов, А.С. Усанина

Национальный исследовательский Томский государственный университет

E-mail: Usaninaanna@mail.ru

Представлены результаты экспериментального исследования процесса всплытия кластера монодисперсных капель изопарафинового масла в водно-глицериновом растворе в присутствии и в отсутствие поверхностно-активного вещества на межфазной границе в области чисел Рейнольдса $Re = 0,01 \div 1$. Проанализировано влияние начальной объемной концентрации капель в кластере на динамику его всплытия. Получены новые экспериментальные данные по коэффициенту сопротивления кластера монодисперсных капель, всплывающих в присутствии и в отсутствие поверхностно-активного вещества на межфазной границе.

Ключевые слова: кластер капель, поверхностно-активное вещество, начальная объемная концентрация, коэффициент сопротивления, экспериментальное исследование.

Введение

При изучении динамики двухфазных систем при различных режимах обтекания жидкокапельной дисперсной фазы важную роль играют процессы взаимодействия дисперсной фазы и внешней дисперсионной среды, в частности межфазное сопротивление или относительная скорость дисперсной фазы и дисперсионной среды. На динамику жидкокапельных систем существенно влияют поверхностно-активные вещества (ПАВ) [1, 2], которые вводятся в объем жидкости. Молекулы ПАВ, состоящие, как правило, из гидрофильной головки и гидрофобного хвоста, концентрируются на границах раздела фаз, образуя буферную зону между внешней дисперсионной жидкостью и молекулами капельной жидкости и уменьшая межфазное натяжение.

Вопрос о влиянии ПАВ на динамику кластера капель жидкости в другой несмешивающейся жидкости актуален при решении ряда технологических задач. Детальное изучение динамики движения капель в другой жидкости необходимо при решении задачи повышения эффективности добычи нефти и газа, при обеспечении однородности и стабильности в косметических изделиях, при производстве лекарственных препаратов

* Исследование выполнено при финансировании Российского научного фонда (грант № 22-79-10028, <https://rscf.ru/project/22-79-10028/>).

с улучшенной растворимостью и стабильных дисперсных систем (например, лекарственных эмульсий), в биотехнологиях в процессах биологического сепарирования (например, в биореакторах). Также движение капель в другой жидкости при различных условиях на межфазной границе находит применение при проектировании большинства жидкостно-жидкостных экстракторов, поскольку размер капель напрямую связан с эффективностью ступени экстрактора, а конечная скорость — с производительностью оборудования [3, 4].

Физическое и математическое моделирование задачи о динамике капель в присутствии ПАВ на межфазной границе проводилось преимущественно для случая движения одиночной капли в неограниченном объеме жидкости [5–13] и для пристенного движения капельной среды [14–16]. Влияние ПАВ на закономерности движения кластера капель в неограниченном объеме внешней среды исследовалось лишь в единичных работах [17].

Фундаментальные основы процесса обтекания капли в присутствии ПАВ изложены в ряде классических и современных работ [1, 18–21]. Введение поверхностно-активного вещества в жидкость приводит к смене гидродинамического режима движения капель в потоке. В частности, эффект Марангони на поверхности капли, возникающий в результате неоднородности поверхностного натяжения на межфазной границе раздела жидкость – жидкость, приводит к снижению скорости движения капли [1].

При исследовании процесса обтекания капли в присутствии ПАВ следует учитывать многочисленные аспекты, такие как место ввода ПАВ (в каплю или во внешнюю среду), закономерности распространения ПАВ на межфазной границе, тип поверхностно-активного вещества, характер потери устойчивости межфазной границы.

При исследовании движения капли в другой жидкости в присутствии ПАВ независимо от места ввода ПАВ наблюдается его сорбция на межфазной поверхности, перенос как вдоль поверхности, так и в другую жидкость, что приводит к неравномерному распределению ПАВ вдоль поверхности. ПАВ будет присутствовать в обеих фазах независимо от места его ввода. При вводе в каплю ПАВ в процессе ее движения будет переноситься во внешнюю жидкость, а если ПАВ вводится во внешнюю среду, то оно будет проникать в каплю. Качественное распределение ПАВ в потоке будет различаться в зависимости от места его ввода.

В зависимости от концентрации ПАВ выделяют три модели его распространения на межфазной поверхности [22]. Первая модель характеризуется небольшим количеством ПАВ. В частности, при всплытии капли молекулы ПАВ сносятся с ее передней поверхности к кормовой части, поэтому в передней области капли поверхностное движение сохраняется, а в кормовой тормозится за счет эффекта Марангони. При увеличении числа молекул ПАВ в растворе реализуется вторая модель, при которой происходит «затвердевание» всей поверхности частицы. Третья модель характеризуется большими значениями концентрации ПАВ, когда исчезает сила, стремящаяся затормозить поверхностное движение капли, и поверхностное движение капли восстанавливается.

Влияние на динамику движения капель также оказывает тип ПАВ. Динамика характеризуется такими параметрами, как коэффициент диффузии ПАВ в жидкости (или по поверхности), коэффициент адсорбции, параметр десорбции, предельная адсорбция ПАВ и др. Значения указанных параметров определяются экспериментально.

Наличие ПАВ приводит к изменению формы капли. В частности, в области чисел Рейнольдса $Re > 1$ изначально эллипсоидальная капля после введения ПАВ приобретает форму сферы [23].

Таким образом, для детального понимания процесса движения кластера капель в другой жидкости в присутствии ПАВ требуется проведение исследований с варьированием определяющих параметров в широком диапазоне.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования процесса всплытия кластера монодисперсных капель жидкости в другой несмешивающейся жидкости в присутствии ПАВ на межфазной границе в зависимости от начальной объемной концентрации капель в кластере. Исследование проведено с целью расширения фундаментальных знаний о динамике кластера деформируемых частиц дисперсной фазы (капель, пузырьков) в присутствии ПАВ на поверхности раздела фаз. При этом изучается нестесненное движение кластера капель в не ограниченном стенками объеме жидкости. Для получения сведений об отличительных особенностях движения кластера капель в присутствии ПАВ в работе проведены также эксперименты для кластера капель, движущихся в отсутствие ПАВ.

Экспериментальная установка и методика исследования

Экспериментальная установка для исследования закономерностей движения кластера капель жидкости в другой несмешивающейся жидкости состоит из прозрачной кюветы, устройства для получения кластера с равномерным распределением капель в объеме жидкости и системы визуализации рассматриваемого процесса (рис. 1).

Кювета 2 с плоскопараллельными стенками размером $300 \times 300 \times 900$ мм изготовлена из стекла толщиной 5 мм. В качестве внешней жидкости (дисперсионной среды) использовался 90%-й водно-глицериновый раствор, который заливался в кювету. В водно-глицериновый раствор вводилось неионогенное ПАВ — диламид.

Для создания кластера капель использовалось устройство 4, представляющее собой коллектор цилиндрической формы с перфорированной верхней крышкой, расположенный в нижней части кюветы. Коллектор через металлическую полую трубку 3, расположенную вдоль стенки кюветы, соединен с герметичной емкостью 1, наполненной исследуемой жидкостью. Емкость с жидкостью (базовым изопарафиновым маслом) через гибкий шланг соединена с источником газа, с помощью которого создавалось требуемое давление в емкости. В качестве источника газа применялся баллон со сжатым воздухом, соединенный через гибкий силиконовый шланг с коллектором. Для контроля давления в коллекторе использовался манометр.

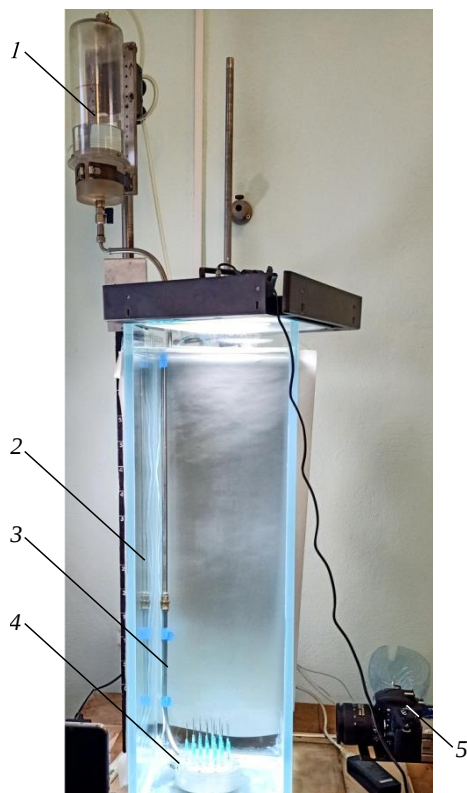


Рис. 1. Экспериментальная установка для исследования процесса движения кластера капель жидкости в другой несмешивающейся жидкости.

1 — емкость с жидкостью, 2 — кювета с жидкостью, 3 — полая металлическая трубка, 4 — устройство для получения капель, 5 — видеокамера.

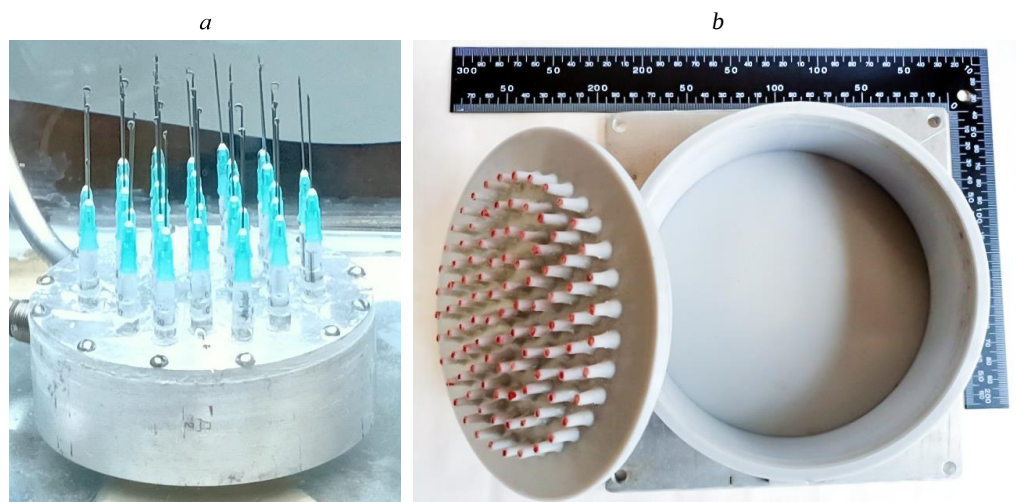


Рис. 2. Коллектор для получения кластера монодисперсных капель.

В верхней крышке коллектора в ее центре и по равноотстоящим концентрическим окружностям выполнены перфорации, в которых установлены трубки одинакового диаметра и высоты для подачи капель жидкости в другую несмешивающуюся жидкость. В экспериментах использовался коллектор с максимальным диаметром перфорированной окружности 8 см (рис. 2а) с 31 трубкой (расстояние между трубками 1,4 мм) и 12 см (рис. 2б) с 99 трубками (расстояние между трубками 1,1 мм).

Размер капель в разработанном устройстве варьировался путем использования сменных медицинских игл, которые герметично закреплялись на трубках. Количество и, следовательно, начальная объемная концентрация капель в кластере варьировались резиновыми заглушками, которые надевались на трубки коллектора.

На входе коллектора устанавливался электропневмоклапан 1 (рис. 3) для включения подачи жидкости. В экспериментах использовался миниатюрный электропневмоклапан марки 2V025 с напряжением питания 12 В. Открытие электропневмоклапана задавалось с помощью запрограммированного контроллера 2 (см. рис. 3). С помощью контроллера подавалось электрическое напряжение 12 В от источника питания на электропневмоклапан, что приводило к его открытию и формированию капель жидкости на концах игл. Для обеспечения одинакового размера и одновременного ввода капель в жидкость перед открытием электропневмоклапана выравнивался уровень жидкости во всех трубках.

Система визуализации включает две видеокамеры, в том числе высокоскоростную камеру марки MER2-502-79U3C (со скоростью видеосъемки до 700 кадров в секунду), и два источника светодиодного света со световым потоком 4000 лм.

Измеряемые параметры

При проведении экспериментов измерялись следующие параметры процесса: плотность ρ_l и коэффициент динамической вязкости μ_l внешней жидкости, плотность ρ и коэффициент динамической вязкости μ дисперсной жидкости, начальная объемная концентрация кластера капель C_V , диаметр кластера капель D , коэффициент межфазного натяжения σ на границе жидкость – жидкость, скорость кластера капель $u(t)$.

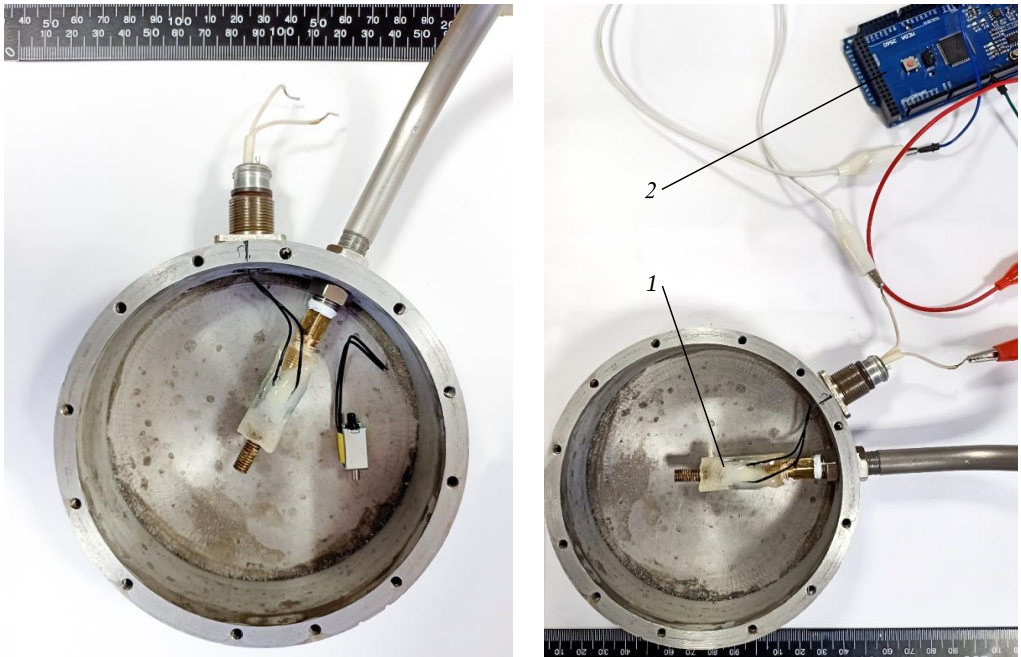


Рис. 3. Фотография коллектора с монтированным электропневмоклапаном.

1 — электропневмоклапан, 2 — контроллер.

Плотность водных растворов глицерина с ПАВ и изопарафинового масла измерялась ареометром с относительной погрешностью 0,1 % и составляла $\rho_l = 1246 \text{ кг/м}^3$ и $\rho = 835 \text{ кг/м}^3$ соответственно.

Коэффициент динамической вязкости водно-глицеринового раствора составлял $\mu_l = 0,4 \text{ Па}\cdot\text{с}$ и определялся по измеренной скорости стационарного осаждения одиночного стального шарика диаметром $D_p = 1,3 \text{ мм}$ и плотностью $\rho_p = 7900 \text{ кг/м}^3$ в стоксовском режиме ($\text{Re}_p = \rho_l D_p u_p / \mu_l < 1$, $(C_D)_p = 24 / \text{Re}_p$) по формуле

$$\mu_l = \frac{g D_p^2 (\rho_p - \rho_l)}{18 u_p},$$

где $(C_D)_p$ — коэффициент сопротивления одиночной частицы, u_p — скорость стационарного осаждения стального шарика.

Коэффициент динамической вязкости базового изопарафинового масла μ определялся с помощью вискозиметра Гепплера с относительной погрешностью не более 2 %. В экспериментах коэффициент динамической вязкости базового изопарафинового масла составлял $\mu = 15,6 \text{ мПа}\cdot\text{с}$.

Диаметр капель d , входящих в кластер, определялся с помощью компьютерной обработки полученного видеоряда процесса всплытия капель с погрешностью не более 1,5 %. Диаметр капель в экспериментах варьировался в диапазоне $d = 2,5 \div 5 \text{ мм}$.

В проведенных экспериментах не ставилась задача получения исходного кластера капель сферической формы. Эта задача, в частности, была решена при получении сферического кластера монодисперсных пузырьков [24]. В экспериментах с описанным

выше устройством получался компактный кластер капель, который в начальный момент времени имел форму, близкую к сферической (с некоторыми отклонениями от идеальной сферы). Близость формы кластера к сферической связана, по-видимому, с цилиндрической формой коллектора для подачи капель и некоторыми флуктуациями, вызванными взаимодействием между каплями при всплывании. Начальный диаметр кластера капель определялся формулой

$$D = \frac{D_1 + D_2}{2},$$

где D_1 , D_2 — средние значения диаметров Миделева сечения кластера в горизонтальном и вертикальном направлениях. Начальный диаметр кластера капель изменялся в диапазоне $D = 5 \div 9$ см.

Расстояние, пройденное кластером капель, и скорость его движения определялись покадровой обработкой результатов видеосъемки. Скорость кластера капель определялась с момента формирования кластера до его распада. Началом распада кластера считался момент установления режима «продуваемого» облака (в соответствии с классификацией Н.А. Фукса [25]), когда капли при движении не взаимодействуют и не оказывают влияния на скорость движения соседних капель, а кластер движется со скоростью одиночной капли. Средняя скорость кластера монодисперсных капель определялась по скорости всплывания центра масс кластера капель и вычислялась по формуле $u = s/t$, где s — пройденное кластером расстояние за время t . Погрешность измерения s , связанная с искажением изображения и разрешающей способности видеокамеры, составляла $\pm 0,1$ мм. Средняя скорость всплывания кластера монодисперсных капель в экспериментах изменялась в диапазоне $u = 0,6 \div 2,5$ см/с.

При определении центра масс кластера всплывающий кластер ограничивался окружностью диаметром D , включающей все капли кластера и максимально приближенной к его границам. Центр масс кластера совпадал с центром этой окружности.

Начальная объемная концентрация кластера капель определялась на расстоянии около 5 см от игл коллектора и рассчитывалась по формуле

$$C_V = N \frac{V_p}{V} = N \left(\frac{d}{D} \right)^3,$$

где N — количество капель, содержащихся в кластере, V_p , V — объем одиночной капли в составе кластера и объем кластера капель. Начальная объемная концентрация кластера капель в экспериментах варьировалась в диапазоне $C_V = 0,001 \div 0,02$. Объемная концентрация кластера связана с диаметром d капель и расстоянием l между центрами капель соотношением $C_V = \pi/6k^3$ ($k = l/d$ — безразмерное расстояние между центрами капель) [29]. В экспериментах величина k изменялась в диапазоне $k = 3 \div 8,1$.

Коэффициент межфазного натяжения σ на границе изопарафинового масла и водно-глицеринового раствора в присутствии и в отсутствие ПАВ определялся в соответствии с ГОСТ [26] на сталагмометре СТ2, принцип работы которого основывается на методе определения объема капель, выдавливаемых на границе двух жидкостей. Значения коэффициента межфазного натяжения σ на границе водно-глицеринового раствора и изопарафинового масла в зависимости от концентрации диамида приведены в табл. 1.

Таблица 1
Зависимость коэффициента межфазного
натяжения от концентрации
поверхностно-активного вещества

C , г/л	σ , мН/м
0	12,1
0,32	9,5
10	6,3

Результаты экспериментов

Эксперименты по всплытию кластера монодисперсных капель в присутствии и в отсутствие ПАВ проведены в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = \rho_l u D / \mu_l = 0,01 \div 1$.

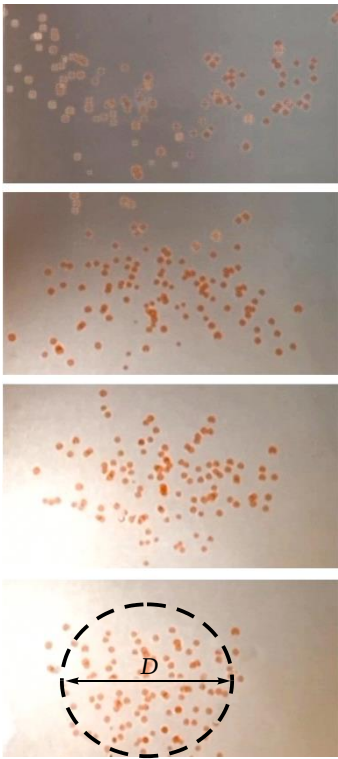
Анализ экспериментальных данных показал, что начальная объемная концентрация кластера капель определяет динамику всплытия кластера капель: общую картину движения кластера, закономерности взаимодействия капель в кластере, скорость всплытия кластера (его коэффициент сопротивления).

Экспериментально показано, что при всплытии кластера монодисперсных капель, по аналогии со случаем всплытия монодисперсного кластера пузырьков [27], наблюдаются два типа всплытия кластера: контактный, предполагающий наличие столкновений между каплями, приводящих к их взаимодействию, и бесконтактный, характеризующийся отсутствием столкновений между каплями в кластере. В исследованном диапазоне чисел Re бесконтактный тип всплытия реализуется при начальной объемной концентрации кластера $C_V = 0,002 \div 0,006$, а контактный тип всплытия — при $C_V \geq 0,006$.

Экспериментально обнаружено, что при $C_V < 0,0065$ кластер по мере увеличения расстояния, пройденного каплями, постепенно расширяется, т.е. эквивалентный сферический диаметр кластера капель постепенно увеличивается. Расширение кластера происходит до тех пор, пока капли не начинают двигаться как одиночные частицы без влияния на скорость движения соседних капель. При значениях $C_V \geq 0,0065$ после формирования кластера наблюдается единичная циркуляция периферийных капель в направлении, противоположном движению кластера капель. После этого кластер расширяется в поперечном направлении и затем распадается, приобретая чашеобразную форму (рис. 4). Эти общие картины движения капель не зависят от присутствия/отсутствия ПАВ на межфазной границе.

Экспериментально определено значение предельной начальной объемной концентрации капель C_V^* в кластере, соответствующее началу динамического взаимодействия капель в процессе их движения и, как следствие, увеличению скорости кластера по сравнению со скоростью одиночной капли. Экспериментально выявлено, что значение C_V^* для кластера монодисперсных капель жидкости, движущихся в другой жидкости, составляет 0,002. В пересекающемся диапазоне чисел Рейнольдса полученное значение C_V^* совпадает с величиной предельной начальной объемной концентрации, полученной для кластера монодисперсных пузырьков [27]. Найденное значение C_V^* не зависит от концентрации ПАВ в жидкости.

Получены данные о влиянии начальной объемной концентрации кластера монодисперсных капель на скорость его всплытия. Обнаружено, что по сравнению со скоростью одиночной капли скорость кластера капель возрастает при фиксированном начальном



18,1 с
6,1 с
2,7 с
0 с

Рис. 4. Фотографии всплытия капель изопарафинового масла в водно-глицериновом растворе в присутствии диламида ($C = 0,32$ г/л).

диаметре кластера по мере увеличения начальной объемной концентрации капель. Экспериментальные значения скорости капель изопарафинового масла в водно-глицериновом растворе, осредненные по пяти дублирующим опытам, приведены в табл. 2. Это объясняется возникновением вихревых течений за счет взаимодействия потока жидкости с каплями и каплей друг с другом. Этот эффект проявляется только при значении объемной концентрации капель, превышающем найденное предельное значение $C_V = C_V^* \geq 0,002$. Подобный эффект отмечен в монографиях [25, 28] и соответствует переходу движения кластера частиц, в том числе и капель, от режима «продуваемого» облака к режиму «частично продуваемого» облака (по классификации [25]). Он не зависит от наличия ПАВ на межфазной границе.

Экспериментальное значение коэффициента сопротивления кластера монодисперсных капель жидкости определялось из уравнения движения одиночной капли в стационарном режиме [29]. Экспериментально обнаружено, что скорость кластера и отдельной капли, входящей в кластер, совпадает, поэтому коэффициент сопротивления кластера капель рассчитывался по диаметру отдельной капли, входящей в кластер:

$$C_D = \frac{4}{3} \cdot \frac{gd(\rho_l - \rho)}{\rho_l u^2}.$$

Экспериментальные зависимости коэффициента сопротивления кластера монодисперсных капель и одиночной капли от числа Рейнольдса, приведенные на рис. 5, свидетельствуют о том, что в диапазоне $Re = 0,01 \div 1$ коэффициент сопротивления капельного кластера меньше на $\sim 17\%$, чем для одиночной капли. Аппроксимационная линия 2 на рис. 5 соответствует зависимости Адамара – Рыбчинского $C_D = 16/Re$ для коэффициента сопротивления одиночной капли [19, 29].

Таблица 2
Экспериментальные данные по скорости всплытия капель (u_0)
и кластера капель (u)

d , мм	N	D , см	C_V	k	u_0 , см/с	u , см/с
2,8	32	7,6	0,002	6,4	$0,52 \pm 0,01$	$0,99 \pm 0,02$
3,0	40	7,7	0,003	5,6	$0,73 \pm 0,01$	$1,16 \pm 0,03$
4,0	30	7,0	0,010	3,7	$1,41 \pm 0,01$	$1,98 \pm 0,04$
4,6	26	6,5	0,010	3,7	$1,75 \pm 0,01$	$1,88 \pm 0,04$

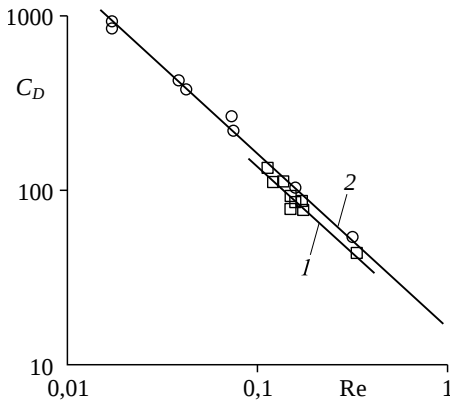


Рис. 5. Экспериментальные зависимости коэффициента сопротивления монодисперсного кластера (1) с концентрацией $C_V = 0,01$ и одиночной капли (2) от числа Рейнольдса (сплошные линии — аппроксимация).

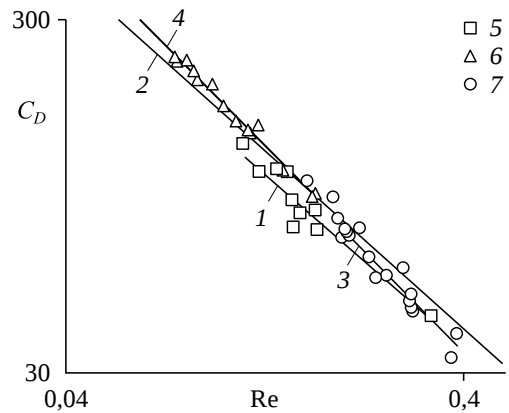


Рис. 6. Экспериментальная зависимость коэффициента сопротивления кластера капель изопарафинового масла в отсутствие (1, 5) и в присутствии (3, 4, 6, 7) диламида от числа Рейнольдса. 2 — кривая Адамара-Рыбчинского для одиночной капли; 6, 7 — концентрация диламида $C = 0,32$ и 10 г/л.

Для оценки влияния ПАВ на динамику капельного кластера на рис. 6 приведены экспериментальные значения коэффициента сопротивления кластера от числа Рейнольдса при различных концентрациях ПАВ. Для сравнения полученных данных по коэффициенту сопротивления кластера капель с динамикой осаждения одиночной капли, всплывающей в отсутствие ПАВ [1, 18], приведена зависимость Адамара-Рыбчинского $C_D = 16/Re$ (линия 2 на рис. 6). На рис. 6 видно, что при наличии ПАВ в жидкости коэффициент сопротивления кластера капель возрастает. Это связано со сменой гидродинамического режима движения капель в кластере.

В исследованной области $Re = 0,01 \div 1$ для диапазона коэффициента межфазного натяжения $\sigma = 6,3 \div 12,1$ мН/м обнаружено, что по мере увеличения концентрации ПАВ скорость кластера монодисперсных капель уменьшается, а коэффициент сопротивления, следовательно, увеличивается (см. рис. 6). Таким образом, по мере увеличения концентрации ПАВ происходит рост касательных сил, стремящихся затормозить движение границы раздела [30].

На рис. 6 видно, что наклон полученной эмпирической кривой коэффициента сопротивления кластера капель в зависимости от числа Рейнольдса $C_D(Re)$ в присутствии ПАВ отличается от наклона кривой $C_D(Re)$ в отсутствие ПАВ и аналогичен наклону экспериментальной кривой $C_D(Re)$ для случая всплывания кластера монодисперсных пузырьков [27]. Это свидетельствует о том, что при движении кластера капель жидкости в другой несмешивающейся жидкости (так же как для процесса всплывания кластера пузырьков) большое влияние на динамические характеристики процесса оказывает время достижения «равновесного» межфазного натяжения на границе двух жидкостей. Время установления «равновесного» межфазного натяжения зависит от времени «жизни» (времени нахождения капель жидкости в другой несмешивающейся жидкости) капель и их размера. Угол наклона эмпирических кривых $C_D(Re)$, представленных на рис. 6 для случая движения при наличии ПАВ, указывает, что для капель меньшего размера (меньшие значения Re) быстрее достигалось «равновесное» межфазное натяжение в процессе движения капель и наблюдалось наибольшее увеличение коэффициента сопротивления, чем для капель большего размера (большие значения Re).

Заключение

Получены новые экспериментальные данные по динамике кластера монодисперсных капель в присутствии и в отсутствие ПАВ в области чисел Рейнольдса $Re = 0,01 \div 1$ при варьировании начальной объемной концентрации пузырьков в диапазоне $C_V = 0,001 \div 0,02$.

Разработано устройство для получения кластера монодисперсных капель жидкости в другой несмешивающейся жидкости. Преимуществами разработанного устройства являются равномерное распределение монодисперсных капель в объеме жидкости, устойчивое образование капель, а также возможность варьирования диаметра капель и их объемной концентрации.

Начальная объемная концентрация капель в кластере является одним из основных параметров, определяющих динамику всплытия кластера монодисперсных капель жидкости в другой жидкости.

Установлено, что в зависимости от начальной объемной концентрации кластера капель C_V реализуются два типа его всплытия: в диапазоне $C_V = 0,002 \div 0,006$ ($k = 3 \div 8,1$) капли в кластере всплывают бесконтактно, т.е. без столкновений, а при значениях $C_V \geq 0,006$ капли при всплытии сталкиваются между собой и коагулируют.

Обнаружено влияние начальной объемной концентрации капель C_V на общую картину движения кластера монодисперсных капель в жидкости. В диапазоне $C_V < 0,0065$ после формирования кластера наблюдается его постепенное расширение при всплытии, а при $C_V \geq 0,0065$ — единичная циркуляция периферийных капель в направлении, противоположном движению кластера капель, сопровождающаяся расширением кластера в поперечном направлении и приобретением чашеобразной формы в процессе всплытия.

Экспериментально определено значение предельной начальной объемной концентрации кластера капель $C_V^* = 0,002$, соответствующее увеличению скорости движения кластера при $C_V \geq C_V^*$ по сравнению со скоростью движения одиночной капли (реализуемой при значениях $C_V = 0,001 \div 0,002$) и началу установления режима «частично продуваемого» облака. Увеличение скорости кластера капель при $C_V \geq C_V^*$ связано с возникновением вихревых течений за счет взаимодействия потока жидкости с каплями и капель друг с другом. Полученное значение C_V^* не зависит от наличия ПАВ на межфазной поверхности.

Показано, что коэффициент сопротивления кластера монодисперсных капель возрастает при введении ПАВ во внешнюю жидкость, что, по-видимому, связано с ростом касательных сил, стремящихся затормозить движение поверхности каждой из входящих в кластер капель. При этом величина коэффициента сопротивления кластера капель увеличивается по мере возрастания концентрации ПАВ на межфазной границе.

Основные обозначения

C — концентрация поверхностно-активного вещества в жидкости, г/л;	s — расстояние, пройденное кластером капель, м;
C_V — начальная объемная концентрация капель в кластере;	t — время, с;
C_D — коэффициент сопротивления;	u — скорость всплытия, м/с;
d — диаметр одиночной капли, входящей в кластер, м;	μ — коэффициент динамической вязкости жидкости, кг/(м·с);
D — начальный диаметр кластера капель, м;	ρ — плотность жидкости, кг/м ³ ;
	σ — коэффициент межфазного натяжения, Н/м;
	Re — число Рейнольдса.

Индексы

l — внешняя жидкость;	0 — одиночная капля.
-------------------------	------------------------

Список литературы

1. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1959. 700 с.
2. Абрамзон А.А. Поверхностно-активные вещества: Свойства и применение. Л.: Химия, 1981. 304 с.
3. Петров Б.И., Леснов А.Е. Современное состояние экстракционного метода: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2018. 356 с.
4. Петров Б.И. Жидкость-жидкостная экстракция: вчера, сегодня, завтра // Изв. Алт. гос. ун-та. 2010. № 3-1. С. 184–191.
5. Griffith R.M. The effect of surfactants on the terminal velocity of drops and bubbles // Chem. Engng Sci. 1962. Vol. 17, Iss. 12. P. 1057–1070.
6. Edge R.M., Grant C.D. The motion of drops in water contaminated with a surface-active agent // Chem. Engng Sci. 1972. Vol. 27. P. 1709–1721.
7. Myint W., Hosokawa S., Tomiyama A. Terminal velocity of single drops in stagnant liquids // J. Fluid Sci. and Technol. 2006. Vol. 1, No. 2. P. 72–81.
8. Hosokawa S., Masukura Y., Hayashi K., Tomiyama A. Experimental evaluation of Marangoni stress and surfactant concentration at interface of contaminated single spherical drop using spatiotemporal filter velocimetry // Intern. J. Multiphase Flow. 2017. No. 97. P. 157–167.
9. Hosokawa S., Hayashi K., Tomiyama A. Evaluation of adsorption of surfactant at a moving interface of a single spherical drop // Experim. Thermal and Fluid Science. 2018. No. 96. P. 397–405.
10. Lalanne B., Masbernat O., Risso F. Determination of interfacial concentration of a contaminated droplet from shape oscillation damping // Phys. Rev. Lett. 2020. Vol. 124, Iss. 19. P. 194501-1–194501-13.
11. Li X.-J., Mao Z.-S. The effect of surfactant on the motion of a buoyancy-driven drop at intermediate Reynolds numbers // J. Colloid and Interface Science. 2001. No. 240. P. 307–322.
12. Liu H., Ba Y., Wu L., Li Z., Xi G., Zhang Y. A hybrid lattice Boltzmann and finite difference method for droplet dynamics with insoluble surfactants // J. Fluid Mech. 2018. Vol. 837. P. 381–412.
13. Yamamoto Y., Yamauchi M., Uemura T. Numerical simulation of a contaminated water drop sinking in a oil by a front-tracking method // J. Comput. Science and Technol. 2008. No. 2. P. 246–257.
14. Almatroushi E., Borhan A. Surfactant effect on the buoyancy-driven motion of bubbles and drops in a tube // Ann. N.Y. Acad. Science. 2004. No. 1027. P. 330–341.
15. Kurimoto R., Hayashi K., Tomiyama A. Terminal velocities of clean and fully-contaminated drops in vertical pipes // Intern. J. Multiphase Flow. 2013. No. 49. P. 8–23.
16. Baret J.C. Surfactants in droplet-based microfluidics // Lab. on a Chip. 2012. Vol. 12, No. 3. P. 422–433.
17. Gal-or B., Waslo S. Hydrodynamics of an ensemble of drops (or bubbles) in the presence or absence of surfactants // Chem. Engng Science. 1968. Vol. 23. P. 1431–1446.
18. Фрумкин А.Н., Левич В.Г. О влиянии поверхностно-активных веществ на движение на границе жидких сред // Журн. физ. химии. 1947. Т. 21, вып. 10. С. 1183–1204.
19. Clift R., Grace J.R., Weber M.E. Bubble. Drops and particles. London: Acad. Press, 1978. 380 p.
20. Takagi S., Matsumoto Y. Surfactant effects on bubble motion and bubbly flows // Ann. Rev. Fluid Mech. 2011. Vol. 43. P. 615–636.
21. Griffith R.M. The effect of surfactants on the terminal velocity of drops and bubbles // Chem. Engng Science. 1962. Vol. 17, Iss. 12. P. 1057–1070.
22. Palaparthi R., Papageorgiou D.T., Maldarelli C. Theory and experiments on the stagnant cap regime in the motion of spherical surfactant-laden bubbles // J. Fluid Mech. 2006. Vol. 559. P. 1–44.
23. Rodrigue D. The effect of surfactants on deformation of falling non-Newtonian drops in a Newtonian liquid // Canad. J. Chem. Engng. 2008. Vol. 86. P. 105–109.
24. Пат. 2670228 Рос. Федерация / Архипов В.А., Басалаев С.А., Усанина А.С., Перфильева К.Г., Поленчук С.Н., Романдин В.И. Устройство для создания компактного кластера монодисперсных пузырьков. Оpubl. 2017. Бюл. № 29.
25. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 350 с.
26. Варежников В.И., Гермашева И.И., Крысин М.Ю. Коллоидная химия поверхностно-активных веществ: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2015. 304 с.
27. Архипов В.А., Усанина А.С., Чуркин Р.А. Закономерности всплытия кластера монодисперсных пузырьков в вязкой жидкости в присутствии поверхностно-активного вещества // Теплофизика и аэромеханика. 2023. Т. 30, № 6. С. 1121–1134.

28. Соу С. Гидродинамика многофазных систем. М.: Мир, 1971. 536 с.
29. Архипов В.А., Васенин И.М., Усанина А.С., Шрагер Г.Р. Динамическое взаимодействие частиц дисперсной фазы в гетерогенных потоках. Томск: Издат. дом Том. гос. ун-та, 2019. 329 с.
30. Борзенко Е.И., Усанина А.С., Шрагер Г.Р. Влияние поверхностно-активного вещества на скорость всплытия пузырька в вязкой жидкости // Вестн. Том. гос. ун-та. Математика и механика. 2023. № 84. С. 81–92.

*Статья поступила в редакцию 24 мая 2024 г.,
после доработки — 2 сентября 2024 г.,
принята к публикации 8 ноября 2024 г.*